

[19]中华人民共和国国家知识产权局

[51]Int. Cl<sup>6</sup>

G02B 6/12

B29C 67/00

## [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 97180431.1

[43]公开日 1999 年 12 月 29 日

[11]公开号 CN 1240030A

[22]申请日 97.10.6 [21]申请号 97180431.1

[30]优先权

[32]96.10.9 [33]GB [31]9621049.7

[86]国际申请 PCT/GB97/02723 97.10.6

[87]国际公布 WO98/15858 英 98.4.16

[85]进入国家阶段日期 99.6.9

[71]申请人 英国国防部

地址 英国汉普郡

[72]发明人 T·J·舍帕德 P·R·塔普斯特

[74]专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

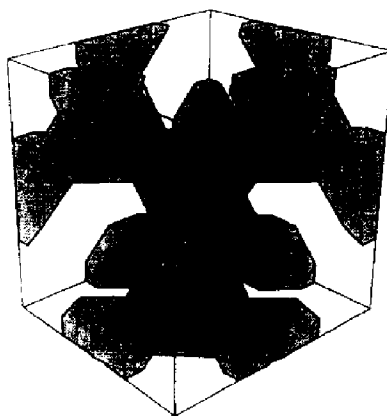
代理人 魏金玺 钟守期

权利要求书 2 页 说明书 10 页 附图页数 4 页

[54]发明名称 电介质复合材料

[57]摘要

一种新颖的制造周期性电介质复合材料的方法,包括灵活的计算机设计平台,快速生长第二电介质组分。利用激光立体平板制版,通过液体的光致聚合反应一层层地形成聚合物材料层。对透过这些材料的有一定带宽的微波传播而言,按此形式构筑的这些材料表现为完全无损的阻挡材料,而公知作为光子带隙晶体。这种材料可以提供用于全角宽和窄带阻滤波器,窄带通滤波器,平面天线的反射无损基板的新颖介质,和用于空腔谐振器和波导的新颖无损介质。此外,还指出了尤其适合于上述制造方法,并由链接的多面体组成的新颖晶体结构。



ISSN 1008-4274

## 权 利 要 求 书

1. 一种具有周期性空间分布的两种材料的电介质复合材料的制造方法, 所述的材料具有充分不同的介电常数, 使得该复合材料提供对一定频率范围内的电磁辐射的阻障, 该方法包括以下步骤:

5 通过配料单体的选择性定位聚合而形成三维结构, 所述的结构包括复合材料的低介电常数材料和对应于高介电常数材料的孔隙, 和在所述的孔隙内浇筑高介电常数材料。

2. 根据权利要求 1 的方法, 其中该三维结构是通过使用激光选择性定位聚合配料单体而形成。

10 3. 根据权利要求 2 的方法, 其中高介电常数材料包括在可固化主体聚合物中的高介电常数粉末。

4. 根据权利要求 1 至 3 中任意一项限定的方法生产的电介质复合材料。

15 5. 一种具有周期性空间分布的低介电常数材料和高介电常数材料的电介质复合材料, 所述的材料具有充分不同的介电常数, 使得该复合材料提供对一定频率范围内的电磁辐射的阻障, 高介电常数材料的结构是链接的多面体形式。

6. 根据权利要求 5 的电介质复合材料, 其中每个多面体是一个通过除去至少一个边棱和/或至少一个顶点而形成的截断四面体。

20 7. 根据权利要求 6 的电介质复合材料, 其中去除了每个顶点。

8. 根据权利要求 7 的电介质复合材料, 其中去除了每个边棱, 且通过除去相应顶点而形成的每个截断平面是正六边形的。

9. 根据权利要求 8 的电介质复合材料, 其中截断四面体是按如下方式在每个六边形截断顶点处成对地连接的: 让一个截断四面体的原四面体平面与邻接截断四面体的截断边棱的平面相邻接。

25 10. 一种具有周期性空间分布的低介电常数材料和高介电常数材料的电介质复合材料, 所述的材料具有充分不同的介电常数, 使得该复合材料提供对一定频率范围内的电磁辐射的阻障, 低介电常数材料包括光致聚合而形成的聚合物。

30 11. 根据权利要求 10 的电介质复合材料, 其中高介电常数材料包括高介电常数粉末与主体聚合物的混合物。

12. 根据权利要求 11 的电介质复合材料, 其中高介电常数粉末包

括钛酸钙。

13. 根据权利要求 11 或 12 的电介质复合材料，其中主体聚合物是乙烯基酯聚合物。

5 14. 根据权利要求 4 至 13 中任一项的电介质复合材料，其中的复合材料具有破坏对称的缺陷，该缺陷导致了对电磁辐射的选择性地透过，该复合材料形成至少部分窄带陷波滤波器。

15. 根据权利要求 4 至 13 中任一项的偶极复合材料，其中复合材料形成偶极天线的至少部分基板。

10 16. 根据权利要求 4 至 13 中任一项的电介质复合材料，其形成至少部分波导，其中波导包括接收电磁辐射的输入端和输出端，该电介质复合材料具有破坏对称的缺陷，这个缺陷使电磁辐射从输入端传播到输出端。

15 17. 根据权利要求 4 至 11 中任一项的电介质复合材料，其形成空腔谐振器内的辐射接收组件，复合材料具有破坏对称缺陷，其使电磁辐射从输入端传播到输出端。

# 说明书

## 电介质复合材料

本发明涉及一种制造电介质复合材料的方法及其所形成的复合材料。术语复合材料是指任何包含彼此间有分立界面的两种材料的介质。

电子能带结构是大多数物理学者和电气工程师所熟知的概念：在晶体材料内部，能带结构描述了电子在外加电场的影响下在材料内可运动的能量范围。这种材料内尤为令人感兴趣的是“电子带隙”——一个能量范围，具有这种能量的电子在该晶体中的传播是受禁的。从晶体内构成原子或分子周期排列而形成的晶面上布喇格反射的电子波的有害影响，造成了该电子带隙。该带隙有助于解释诸如导热和电导性等宏观现象，并可在半导体以及电子器件的设计中加以利用。

Yablonovitch [1]和 John [2]建议，应该对周期性介质中传播的电磁(EM)场使用相似的原理——即介电常数的空间周期性分布可以产生“光子带隙”，这是在周期性介质中电磁传播在各个方向都受禁的一个频率范围。这样的材料是已知的“光子晶体”。“光子的”一词意思是指一种与光和近红外电磁波谱区间中的现象有关，而且这正是 Yablonovitch 等人提出的应用区间。但是，该现象的原理适用于整个电磁波谱范围，而且尽管本文给出的具体例子涉及到微波波段，但这个具体实例不意味着将本发明的范围限制在这样或那样的区间内。

Yablonovitch 和 John 最初都认为面心立方(FCC)晶格是观察光子带隙的最好结构。它存在所有 14 个布喇菲晶格的最接近球面布里渊区，因此最可能存在完全的(即延伸到整个  $4\pi$  立体角)和绝对的(即存在于两个 EM 极化方向)带隙。对整个晶体结构的全面说明，需要用电介质空间分布函数做一基本说明(晶胞的构成)。

Yablonovitch 等人[3]能描述出微波频段中完全的和绝对的光子带隙。他们成功地揭示了在各向同性的高介电常数无损材料——Stycast Hi-K™ 中钻孔而形成的 FCC 晶体中所产生的效应。这种由 Emerson and Cuming (现在是 W.R. Grace 的分部)制造的材料是一种复合材料，它包括低介电常数聚合物(聚苯乙烯)和高介电常数粉状填充物(二氧化钛)。市场上有介电常数为 3 至 30 的电介质填料出售。Yablonovitch 选择了介电常数 12(最接近 13.6 这个砷化镓在光学频段的介电常数)。他的结构是通过钻出三个穿过聚合物

表面上六角形点阵中各点的圆柱形孔隙而制成的。每个圆柱与垂直方向成  $34.26^\circ$ ，在水平方向三个孔隙彼此成  $120^\circ$  角。表面的孔相隔  $11\text{mm}$  且半径为  $0.5\text{mm}$ 。该钻孔过程产生一种结构，在其中圆柱孔隙贯穿到材料内，从而形成了沿  $[111]$  方向单轴对称的 FCC 晶体。该结构有 78% 是空的。这是一个专利的结构[3a]并已经授予“Yablonovite”[4a]。

Yablonovitch [3] 还建议了另一种包括在垂直于  $[111]$  方向的面上钻出另 3 组孔的结构。该后一种结构具有全 6-重菱形对称结构并已经证明不能用钻孔方法制作。已有预言，它比 3-圆柱结构有更宽的带隙[4b]。

Yablonovitch [3] 已经表示出 3-圆柱材料对传播的抑制达到每个晶体层 9dB 的程度。在  $[110]$  方向上，6 层晶体在中心频率 15GHz 周围 20% 宽度的透射频谱中的整个频率间隙上显现出 50dB 的衰减。更为重要的是，当因打破内部电介质桥路而在晶体结构中产生缺陷时，在间隙的中心会出现窄的透过峰[5]。

参考文献 5a, 5b 和 5c 描述了另一种用于制作 3-维光子晶体的结构。该结构由叠层布置的隔开的介质棒组成，并通常具有矩形的截面。该系统的好处在于该结构可以通过叠置一维刻蚀光栅的晶片而制得。

每个这类结构都有很具体的形式，和相应的特定制作方法。实际上，存在着大量的在原理上可以出现光子带隙现象的结构。其中某一种结构可能会存在比其它结构更好的物理特性（即，对于给定组成材料之介电常数对比值的带隙宽度）。因此，获得一种构造光子晶体的一般方法是很有价值的。

抑制在材料内的传播是指，晶体块在各个角度无吸收损失地有效地反射带隙内所有进入的辐射。该特性与抑制带内的选择频谱透过率结合在一起，这对潜在的应用是有益的。

带隙本身可以被设计成提供一种宽带截止滤波器（超过中心频率的 30%[4]），并可引入对称断开的缺陷，以在带隙内形成一个透过窗口。它可以被设计成比带隙宽度窄得多；由此得到一种窄带陷波滤波器。

另一种潜在的应用是作为偶极天线的全反射基板，光子晶体起着高效镜面作用，以确保所产生的电磁辐射更多地发射且不被基板吸收。早期的研究已经表明，这样的天线有更高的效率[6]。其它的应用是作为波导和空腔谐振器的无损耗介质。在参考文献 5d 中还揭示了这些结构的许多其它应用。

本发明采用了立体平版制版 (SL) 快速塑型技术。SL 是许许多多的快速塑型技术之一，它可以制备出大规模的三维物体。SL 装置 (SLA) 可以根

据计算机辅助设计 (CAD) 工作站系统上所产生的计算机文件, 在几个小时内构筑起三维宏观物体。

该设计是用有专利权的 3-维模拟 CAD 软件实现的。该软件包括一个将 CAD 文件按一种 .STL 文件输出的滤波器 (.STL 是用于快速塑型的标准文件类型的扩展名)。然后, 用有专利权的软件 (“Bridgeworks”) 修改该 .STL 文件, 以在三维物体的构造中包含所必须的支撑结构。最后, 再用有专利权的软件 (3D System 提供的 “Maestro”, 见下文) 从三维物体中计算出相应的参数, 以通过与个人计算机连接来驱动 SLA 机。

根据本发明, 制造具有周期性空间分布的两种材料的电介质复合材料的方法, 所述的材料具有充分不同的介电常数, 使得该复合材料提供对某频率范围内的电磁辐射的阻障, 该方法包括如下步骤:

通过配料单体的选择性定位聚合而形成三维结构, 所述的结构包括复合材料的低介电常数材料和对应于高介电常数材料的孔隙, 以及

在所述的孔隙内浇铸高介电常数材料。

优选地, 用激光选择性定位光致聚合配料单体而形成三维结构, 且更为优选地, 高介电常数材料包括在可固化主体聚合物中的高介电常数粉末。

根据本发明的第二方面, 一种新颖的晶体具有下文所述的结构 Tapsterite。

现在将参考以下附图, 通过实例说明本发明, 其中:

图 1 表示与利用本发明生产的第一个样品透射特性有关的性能数据;

图 2 表示与利用本发明生产的第二个样品透射和反射特性有关的性能数据;

图 3 表示生产本发明的新晶体结构的经切割所得的四面体;

图 4 表示与本发明所生产的晶体结构对应的第一晶胞; 及

图 5 表示与本发明所生产的晶体结构对应的第二晶胞。

SLA 机的主要制造商是 3D Systems of Valencia, California, USA。用于本发明具体实施例的 SLA-250/40 机, 由可容纳 254mm×254mm×254mm 体积的 SL-5170 液体树脂的紫外 (UV) 屏蔽的机壳而构成。由 Ciba-Geigy 制造的该树脂 (CIBATOOL® SL 树脂) 可通过在紫外光下曝光而固化。该系统包括发射波长为 325nm 的 25mW HeCd 激光器。内部光学系统是指, 照在树脂表面上的光束宽度大约为 0.2mm 的激光束。该光学系统根据所连 PC 计算机传达的数据指令对树脂表面进行光束扫描。

在树脂的表面发生局部固化。对该表面进行全扫描，在紧邻该表面下的升降平台上选择性地聚合一层厚度为 0.125mm 的树脂层。在完成每层扫描之后，平台被降到树脂槽内再提升到比液态树脂表面低 0.125mm 的位置处，为下一次激光扫描作准备。于是，一层接一层地构筑起三维结构，直至达到所需的高度。在构筑完成后，将该结构从槽中提升出来，并从该结构中排去多余的液体树脂。

然后，用异丙醇（IPA），（即 2-丙醇）或三聚乙二醇单甲基醚（TPM）洗涤该结构，以除去残留的过量液体树脂，并最后在后固化装置（PCA）中固化，即把洗涤后的物料置于紫外光的照射下固化所有存留下的未固化单体。

该程序所用的制备方法包括下列步骤。首先，在 CAD 平台上设计出高介电常数的结构，并将其转换成反结构。也即，高介电常数区为空的，反之一样。然后将所得的文件转换成可被快速模型机（在此处是立体平板制版装置，或 SLA）读取的格式。SLA 生长出反预制品。所得的产物是低介电常数（环氧树脂）的模件，在其中可真空浇铸高介电常数材料。实际上，所引入的材料包括含高介电常数粉末的液体树脂。SLA 环氧树脂的介电常数要足够的低（对 2 至 30GHz 微波频段的 Ciba-Geigy SL5170 树脂而言，相对介电常数为 3），以使复合材料有一个足够高的介电对比值，以形成完全和绝对的光子带隙。

该方法包括，用上述标准的 SL 方法初步制造出 SL 聚合物的周期性材料。实际上，这包括 CAD 软件中有关结构晶胞的几何初始特性。在本实例中，SL 聚合物为晶体的低介电常数组分。

后续的软件处理是复制晶胞，以产生周期性结构。进一步的复制可修正该结构，形成相应的器件。

该结构或器件是用标准 SL 技术生长的。

用高介电常数材料填充结构的空隙，以提供必要的对比值。实际上，其中包括了制备包含高介电常数、低损耗粉末与可固化主体聚合物的混合物的填料。在真空条件下将该填料引入到模塑和注塑的 SL 树脂中，且随后使其硬化。

通过用 Aries 三维模拟 CAD 软件在 Sun 工作站上设计出边长为 9.86mm 的立方晶胞而制备出第一种样品，该软件是由 MacNeal-Schwendler 公司开发的。第二种样品也是通过在与设计第一样品使用的相同的系统上设计出边

长为 17.08mm, 12.08mm 和 6.97mm 的长方体晶胞而制得的。两种样品所用的结构是在别处所述的交叉四面体型的。所用的填充比例被设计为 70% 的低介电常数材料比 30% 高介电常数材料。随后测量的构成材料介电常数是 3 和 12.5。

5        .STL 格式的双晶胞文件被传递到 Silicon Graphics Indy 工作站并复制, 并用有专利权的 Maestro 软件 (3D Systems 公司提供的) 在第一样品中给出一层  $23 \times 4$  单元的立方晶胞, 而在第二样品中给出一层  $20 \times 2$  长方体晶胞, 然后再用有专利权的软件 Bridgeworks (美国 Valencia, California, Solid Concepts 公司提供的) 在该结构中添加支撑网格。Maestro 软件也  
10    用于计算 SLA 机构筑该结构所必需的参数。这是一个自动“切片”程序, 它计算构成最终物体的各片 SL 聚合物的参数。PC 软件输出四个“构筑”文件 (名为“vector”, “range”, “layer”, 和“parameter”的文件)。

然后, 这些从工作站输出的文件被输入到连接在 SLA 机上且包含系统控制软件 3D Bluid (3D Systems 公司提供的) 的 PC 计算机中, 该机按指令构  
15    筑有相应支撑的下层, 和位于每个刚生成层垂直上方但没有支撑的后续相同层。对于第一样品而言, 所产生的最终结构是高为 23 个立方晶胞, 测量值大约为  $227\text{mm} \times 227\text{mm} \times 40\text{mm}$ , 而对于第二样品而言, 高为 34 个长方体晶胞, 测量值大约为  $242\text{mm} \times 237\text{mm} \times 34\text{mm}$ 。

第一样品 (对应于立方晶胞) 的取向被安排成, 让较大的晶面代表晶体的  
20    的 [100] 方向。第二样品 (对应于长方体晶胞) 的取向被安排成, 让最大的晶面代表晶体的 [111] 方向。

然后在 TPM 中冲洗样品, 并在后续固化装置中进行固化, 如前所述。

选择用于注入预制品样品的高介电常数填料, 是钛酸钙。聚合物主体是由 Scott Bader, Derakane 8084 用 Butanox LPT 作为催化剂制造的低粘度  
25    乙烯基酯类。

钛酸钙粉末与液体树脂填料按 37% 的体积相混合。凝胶时间试验表明, 5% 重量的催化剂和 5% 重量的促进剂添加到树脂系统中时, 它们将给一个 30 分钟的可用适用期。首先取得固态的混合物固化样品并使其固化, 然后用电介质探针对其进行分析, 在 10GHz 频率处记录下该装置精度范围内 ( $\pm 0.1i$ )  
30    虚部为零的相对介电常数值 12.5, 也就是说, 固化的混合物在测量频率范围内其损耗可忽略不计。

有五点抽气孔的真空盖用于样品的注塑。这个盖是在单个模具上用环氧



树脂预先浸渍玻璃纤维而制作成的。随后，通过盖子上钻出的孔加上英国标准的管路连接，并通过真空弯管连接到真空泵。所用的树脂罐有这样的构造：它仅仅稍稍大于要注入的样品。

5 开启真空泵并让其运行起来，直至无气泡树脂从被注入的块料抽入达树脂收集器内。然后封住连接管上的接头，并关闭真空泵。再用一注射器抽出过多的树脂，直到液面接近块料顶部。树脂一旦固化成凝胶样的稠度（大约30分钟），除去块料，刮去过多的树脂并除去真空盖。让树脂完全固化并随后除去块料。

10 用放置在距第一样品两侧各为60cm的Flann Microwave DP240宽带微波发射机和接收机喇叭，在一定频率范围对上按述方法制备的第一样品透射特性进行测量，以使得辐射波沿[100]晶向垂直于其大晶面地透过该第一样品。

发射的信号一般用惠普公司的矢量网络分析仪8720B产生，该仪器产生2至20GHz的扫描频率。

15 发出的信号由相同的网络分析仪进行分析，并以200KHz为间隔显示测量值。透射率响应的平滑段显示在图1中。它显示出相对于在12GHz处的透过率有大约10dB相对下降，并以14GHz为中心，这个值是用数值计算表示的。带隙的宽度大约3GHz，是中心频率的20%左右。

20 用具有真高斯束分布的微波发射机和接收机的喇叭型辐射体（喇叭的圆形内表面形成有波纹），在一定频率范围内测量按上述方法制备的第二样品的透射和反射特性。发射机的喇叭型辐射体位于距机械抛物镜反射器0.5m处，该反射器用于将入射波90°地反射到第二样品[111]晶面上，而第二样品的[111]晶面与反射器也相距0.5m。透过第二样品的辐射波由一个相似的反射器90°地反射到第二个相同的接收机的喇叭型辐射体上。每个喇叭型辐射体都连接到Wiltron360电路分析仪上，然后与个人计算机控制器接口。系统用一个6737B合成器产生从8.2GHz至18GHz范围内的信号。

用相同的电路分析仪分析发射和反射信号，并以200KHz为间隔显示出来。用两对不同的喇叭型辐射体取得所给出频率间隔上的透射和反射谱：第一对覆盖8.2GHz至12.4GHz区段，而第二对覆盖12.4GHz至18GHz区段。

30 所得的谱表示在图2中。参数 $S_{11}$ 和 $S_{22}$ 表示第二样品对入射到两个相对[111]晶面上辐射波的反射系数，而 $S_{12}$ 和 $S_{21}$ 表示了相应晶面的透射系数。透射系数表示出相对在15GHz处的值有大约12dB的下降，且该下降以大约

12GHz 为中心, 这个值是用数值计算表示的。带隙的宽度大约 4GHz, 是中心频率的大致三分之一。应该注意, 第二样品的反射系数  $S_{22}$  在带隙处的值相对于其在 14.5GHz 的值提高将近 20dB。 $S_{12}$  和  $S_{21}$  所表示的测量值之间反射系数之差, 反映了第二样品两个晶面之间的微小不对称, 这可能是高电介质填料中的微小缺陷 (气泡) 位于所填充腔重要位置而引起的。

除了上述 3-和 6-柱的 Yablonovite 结构之外, 还可设计出包括连锁四面体在内的其它结构。本发明人把该结构称作 “Tapsterite”。它具有 6-柱 Yablonovite 的全菱形对称性, 且由此显示出对于相同的介电对比, 具有比 3-柱 Yablonovite 更宽的带隙。

当一种结构主要包括平面和直的边棱而无曲面时, 它不适于用标准机械加工的方法简单地制备。但是, 这是 SL 方法以及任何在 CAD 设备上进行初始设计之方法的构思, 因为 Aries 软件存储着作为原始平面的表面, 而非曲面: 描述 3-柱 Yablonovite 的 254 个晶胞的 .STL 文件是一个占据 24.8 兆比特的文件; 而 6-柱 Yablonovite 的相同数量的晶胞占据 35 兆比特 (在此例中, 每个圆柱孔包括 40 个平面元); Tapsterite 的相同数量晶胞占据着 9.1 兆比特。此外, 当对树脂的激光扫描沿直线进行时, SL 构筑起来较快。

Tapsterite 具有这样的性质, 它的反结构也是一种形式的 Tapsterite (当然采用共轭填充比例)。

下文将对 Tapsterite 结构的高介电常数部分作一几何描述。该结构由截断的四面体构成。通过截断正四面体 (它的本征形状) 而形成每个截断四面体。从四面体的每个顶点或角上除去一个较小的四面体, 其三个面由原来四面体的三个面限定; 这些四面体大小相同。

通过沿着垂直于从原四面体中心到每个边棱中点所画的连线的矩形平面切割而除去六个边棱 (原四面体各面的交线), 进一步截出所要的物体。该平面的位置是这样的: 原四面体截断的顶点现在呈现为正六边形平面。图 3 表示了这种全截断四面体: 切掉边棱的一个例子是矩形 ABCD。

一旦确定了每个顶点的截断量, 截断程序是唯一的。由这样截断量确定出最终晶体构成组分的填充比例。

通过按下述方法链接截断的四面体 (TTs) 来确定晶体结构: TTs 在每个正六边形截断平面处成对连接, 其具体方式为让一个 TT 的原四面体的平面与邻接的 TT 截断边棱的平面相邻接。

晶体的立方晶胞 (且如上所述也用于生成第一样品) 可以由任何正好包

围住 8 个如下特定取向的 TTs (必要时可以是截断的) 的立方体来限定: 连接着每个 TT 上相对矩形晶面中心的连线平行于立方晶胞外围立方体的面。立方晶胞的容量限定最多为在任何方向上任意直线平移。图 4 表示了这种立方晶胞例子, 其中包括 5 个完整的 TTs 和 12 个四分之一 TTs; 这里四分之一

5 TTs 的中心位于晶胞边棱的 12 个中点上。

如上所述, 用于生成第二样品的长方体晶胞是根据结构的另一种取向, 并且被表示在图 5 中。该晶胞构成了一个有 (可见到) 顶点 T, U, V, W, X, Y, Z 的长方体。它通过除去在所述长方体之外并在所示具有 (可见到) 顶点 M, N, O, P, Q, R, S 外围立方体内部的材料而形成。后一个立方体的容量 (去除之前) 限定为链接成更大立方体的 8 个晶胞的容量, 如前面段落所述。参考其坐标原点位于该大立方体中心的坐标系, 点  $(x, y, z)$  由坐标  $x, y$  和  $z$  表示, 原点在  $(0, 0, 0)$ , 则大立方体顶点处的点 M, N, O, P, Q, R, 和 S 可以分别表示为具体值  $(-1, -1, 1)$ ,  $(-1, 1, 1)$ ,  $(1, 1, 1)$ ,  $(1, 1, -1)$ ,  $(1, -1, -1)$ ,  $(-1, -1, -1)$ ,  $(-1, -1, 1)$ , 和  $(1, -1, 1)$ 。而内部长方体具有 (可看到) 顶点 T, U, V, W, X, Y, Z, 其具体值为  $(-1/2, -1, 0)$ ,  $(-1, -1/2, 0)$ ,  $(0, 1/2, 1)$ ,  $(1/2, 0, 1)$ ,  $(1/2, 1, 0)$ ,  $(1, 1/2, 0)$ ,  $(0, -1/2, -1)$ 。长方体的容量还被限定最大为在任何方向直线平移: 任何这种长方体的容量将用作一个晶胞, 该晶胞可以累接, 以便生成有所希望取向的完整晶格。

参考文献：

1. YABLONOVITCH, E., “抑制固体物理和电子学中的自发辐射” *Phys. Rev. Lett.* 58, 2059, 1987。
2. JOHN, S. “有少许无序的电介质超晶格中光子的强限制” *Phys. Rev. Lett.* 58, 2486, 1987。
3. YABLONOVITCH, E., GMITTER, T. J., 和 LEUNG, K. M., MEADE, R. D., RAPPE, A. M., BROMMER, K. D., 和 JOANNOPOULOS, K. M., “3-维光子能带结构” *Opt. and Qu. Elect.*, 24, S273, 1992。
- 3a. YABLONOVITCH, E., “光反射器结构, 器件, 制造方法, 和通信方法” 国际专利分类 G02B X, 国际公开号 W092/11547, 1992 年 7 月 9 日。
- 4a. JOANNOPOULOS, J. D., MEADE, R. D., 和 WINN, J. N., “光子晶体: 光通量的塑造” (Princeton University 出版, Princeton, N. J., 1995)
- 4b. CHAN, C. T., HO, K. M., 和 SOUKOULIS, C. M., “实验室可实现的周期性电介质结构中的光子带隙”, *Europhys. Letts.* 16, 563, 1991。
5. YABLONOVITCH, E., GMITTER, T. J., MEADE, R. D., RAPPE, A. M., BROMMER, K. D., 和 JOANNOPOULOS, J. D., “光子能带结构中的给体和受体” *Phys. Rev. Lett.* 67, 3380, 1991。
- 5a. OZBAY, E., TUTTLE, G., MICHEL, E., HO, K. M., BISWAS, R., CHAN, C-T. C., 和 SOUKOULIS, C., “用于产生光子带隙的周期性电介质结构及其制造方法” 美国专利 5,406,573, 4. 11, 1995。
- 5b. HO, K-M., CHAN, C-T., 和 SOUKOULIS, C., “用于产生光子带隙的周期性电介质结构以及包括该结构的器件” 美国专利 5,335,250, Aug. 2, 1994; 国际专利分类号 H01S 3/18, 国际公开号 W094/15389, 7 July, 1994。
- 5c. HO, K-M., CHAN, C-T., SOUKOULIS, C. M., BISWAS, R., 和 SIGALAS, M., “三维中的光子带隙: 新的分层周期性结构” *Solid-State Communications*, 89, (5), 413-416, 1994; OZBAY, E., MICHEL, E., TUTTLE, G., BISWAS, R., HO, K-M., BOSTAK, J., 和 BLOOM, D. M., “三维光子带隙晶体的兆兆赫兹频谱” *Optics Letters*, 19, (15),

- August 1, 1994 ; OZBAY, E. , MICHEL, E. , TUTTLE, G. , BISWAS, R. , SIGALAS, M. , 和 HO, K-M. , “微机械加工的毫米波光子带隙晶体” App. Phys. Letts. 64, (16), 2059, 18 April, 1994 ; OZBAY, E. , MICHEL, E. , TUTTLE, G. , BISWAS, R. , HO, K-M. , BOSTAK, J. , 和
- 5 BLOOM, D. M. , “毫米波光子带隙晶体的双刻蚀几何形状” App. Phys. Letts. 65, (13), 1617, 26 Sept. 1994 ; OZBAY, E. , ABEYTA, A. , TUTTLE, G. , TRINGIDES, M. , BISWAS, R. , CHAN, C-T. , SOUKOULIS, C. , 和 HO, K-M. , “电介质棒构成的晶体结构中三维光子带隙的测量” , Phys Rev. B50, (3), 1945, 15 July, 1994 .
- 10 5d. BROMMER, K. , MULLANEY, H. , MEADE, R. , RAPPE, A. , 和 JOANNOPOULOS, J. , “低损耗电介质谐振器件”国际专利分类 H01P 1/207, H01Q 15/00, G02B 5/18, 5/28, 国际公开号 WO 92/15124, 3 Sept. 1992 .
6. CHENG, S. D. , BISWAS, R. , OZBAY, E. , McCALMONT, S. , TUTTLE, G. , 和 HO, K-M. , “光子带隙晶体上的优化偶极天线” Appl. Phys. Letts.
- 15 67, 3399, (1995) .
7. LEUNG, K.M. , 和 LIU, Y. F. , Phys Rev. Letts. , 65, 3152, (1991) ; ZHANG, Z. 和 SATPATHY, S. , 同上, 65, 2650 (1991) ; HO, M. , CHAN, C-T. , 和 SOUKOULIS, C. M. , 同上, 65, 3152 (1991) .

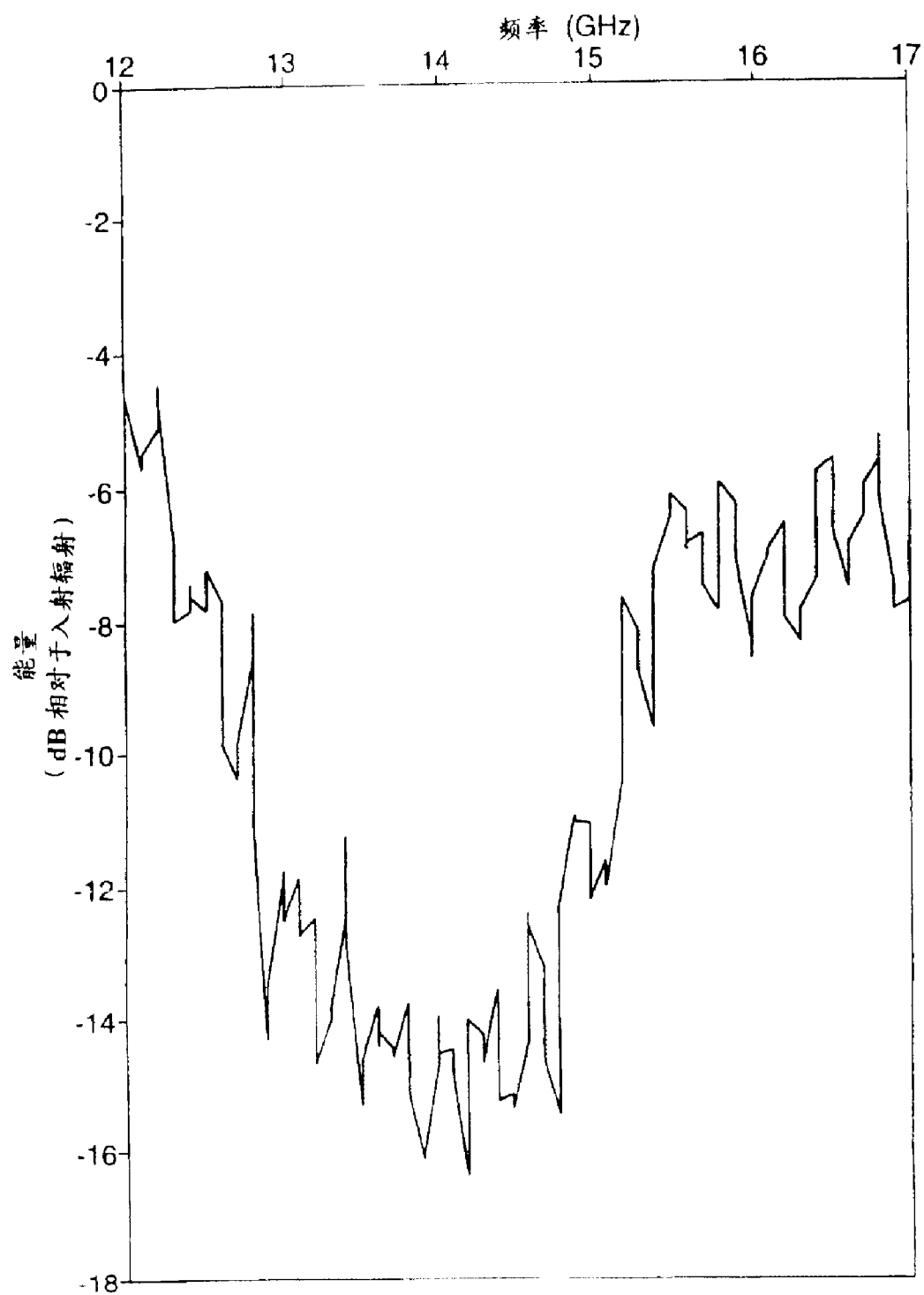


图 1

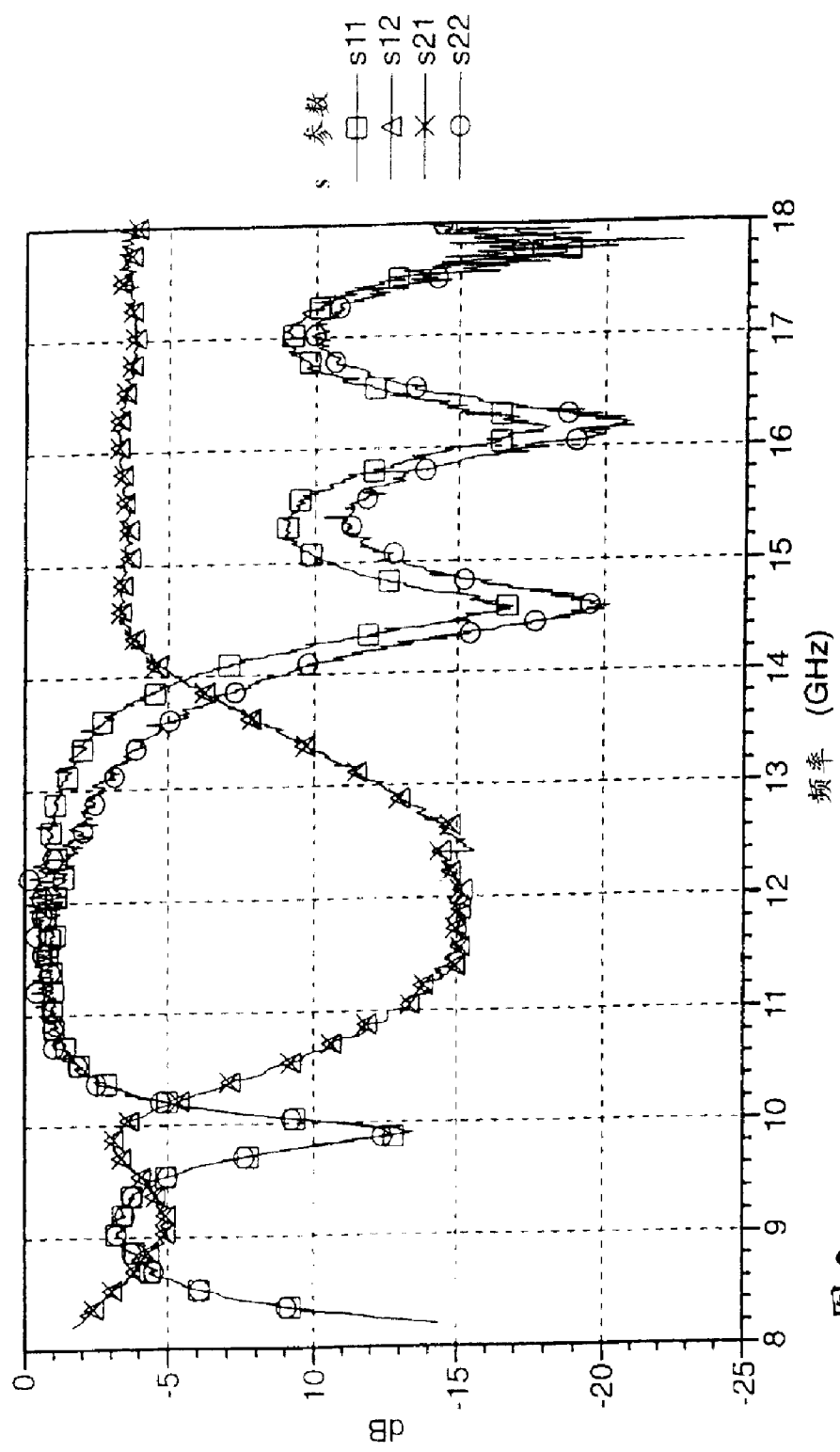


图 2

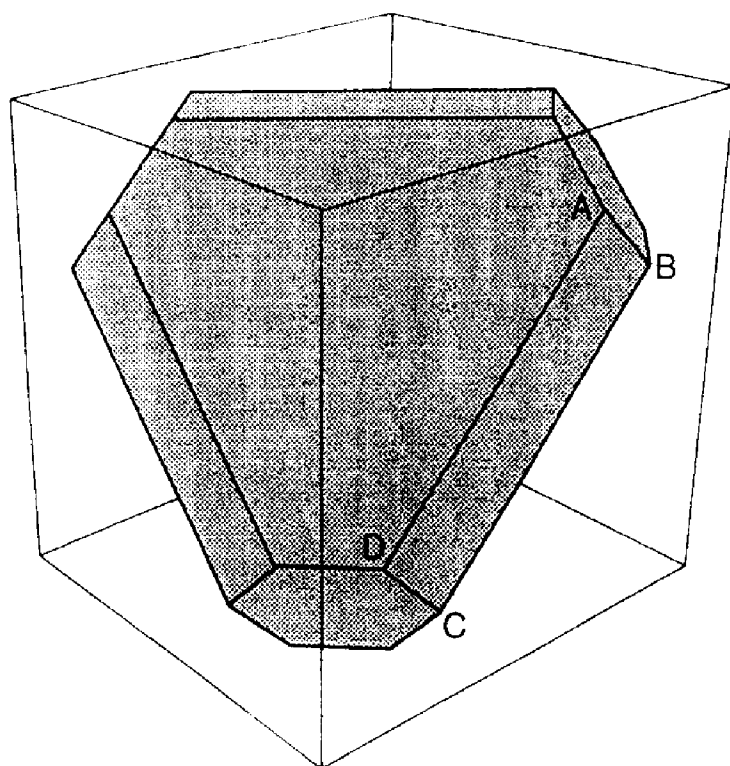


图 3

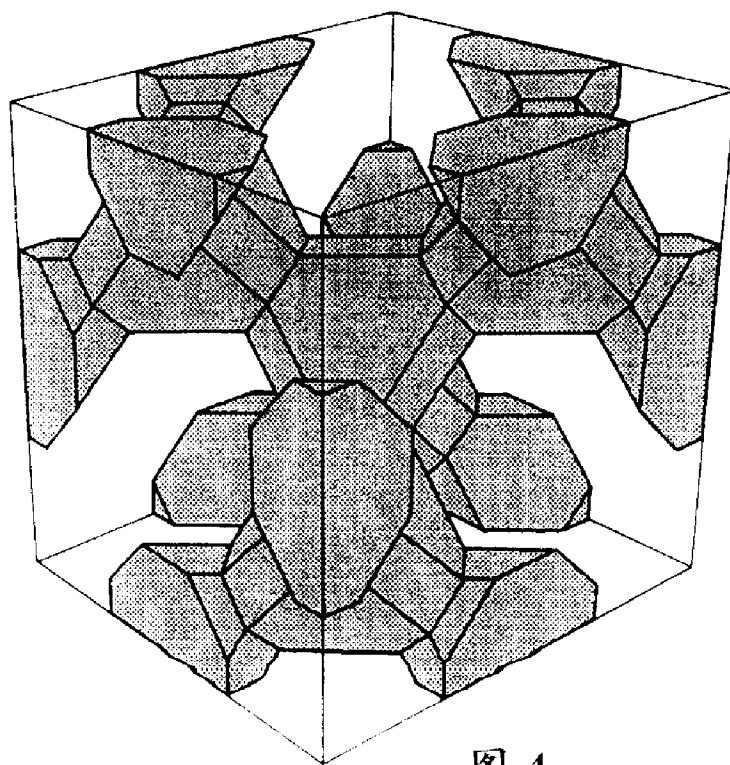


图 4



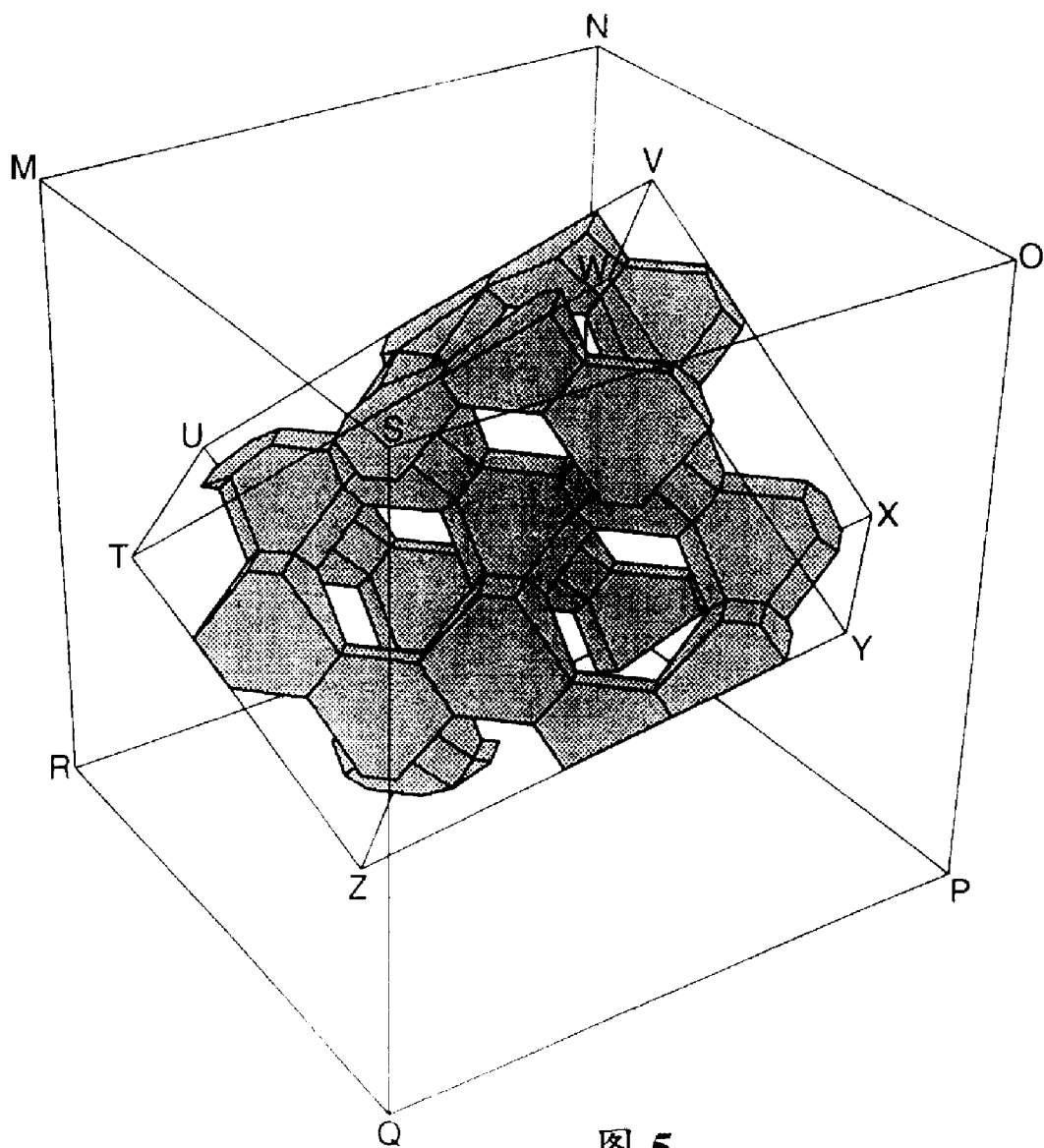


图 5